第46卷 第5期
2023年5月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 5
May 2023

# 膨润土对风沙土理化性质及苏丹草生长的影响

马迪乃·阿布力米提[1,2]， 张勇娟[3]， 王 莉[4]， 赵 力[5]， 李从娟[1,2]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所国家荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 乌鲁木齐市园林绿化工程质量监督站，新疆 乌鲁木齐 830017；
4. 新疆维吾尔自治区草原总站，新疆 乌鲁木齐 830049；5. 国家林业和草原局西北调查规划设计院
旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室，陕西 西安 710049）

**摘 要：**干旱和沙漠化已经成为一个世界性的资源和环境问题，严重限制了沙漠化地区的农林业生产及作物生长，因此开发出一种既保水又可以改善土壤理化性质的材料对该区的发展至关重要。膨润土作为一种天然矿物，独特的晶体结构使其具有良好的吸水、蓄水、保水和吸附能力。研究不同质量分数及组合的膨润土材料添加对风沙土保水能力、物理性质改善及植物生长的影响具有重要的现实性意义。结果表明：（1）质量分数为0.5%膨润土（B1）、2.0%膨润土（B4）及2.0%膨润土+1.0%有机肥（BF4）的添加显著提高了风沙土含水率19.4%~21.9%。（2）所有的膨润土处理均显著改善了风沙土的物理性质，其中膨润土添加量由1.5%增至2.0%时，盆栽土壤容重显著下降9.9%~11.1%（$P<0.05$），总孔隙度显著增加11.7%~13.1%（$P<0.05$），渗透系数显著降低56.7%~73.3%（$P<0.05$），田间持水量显著增加15.4%~16.1%（$P<0.05$）。（3）膨润土（$B>0.5\%$）的添加显著提高了风沙土的pH（$P<0.05$），其余处理均对pH没有显著影响（$P>0.05$），膨润土和腐殖酸（BA）、膨润土+有机肥+腐殖酸（BFA）的添加显著提高了风沙土的电导率（$P<0.05$）。（4）对于植物生长的研究发现添加膨润土和有机肥提高了苏丹草（*Sorghum sudanense*）的发芽率和生物量。（5）相关分析和冗余分析结果表明，膨润土和有机肥是通过改善土壤理化性质，在植物生长过程中发挥重要作用。（6）扫描电镜（SEM）的结果发现膨润土遇水后迅速吸水膨胀，将沙粒与沙粒黏结在一起，充分发挥其吸附、黏结等作用。综上表明，在风沙土中添加膨润土和有机肥可以改善风沙土的物理性质，提高风沙土保水能力，有利于沙漠化地区风沙土的改良和植被恢复。

**关 键 词：膨润土；土壤改良；理化性质；生长状况**
**文章编号：**1000-6060(2023)05-0763-10(0763~0772)

新疆是我国沙漠化土地面积分布最广的区域，由于特殊的自然条件和人类活动的共同作用，土壤侵蚀退化日趋严重，沙漠化区域风沙土持水保肥能力下降，土壤质量日趋低下，造成植被日趋稀少[1-2]。因此，提高风沙土保水能力、改善风沙土土壤结构对沙漠化地区农牧业经济可持续发展、以及生态系统结构和功能的改善至关重要，施用土壤改良剂是加快该进程的重要措施[3-4]。大量的研究表明，土壤中黏土含量可以显著提高土壤水分、土壤酶活性、及土壤肥力等[5-8]。Zhang等[5]研究表明，土壤黏土的微观结构特征与其土壤-水分保持曲线有着密切的关系。Ismail等[6]研究发现，黏土添加不仅节约了约45.0%~64.0%的灌溉用水，还使黄瓜和玉米的产量提高了2.5倍。另外，土壤中添加黏土，可以提高土壤对营养的保释作用[7]，改善土壤微生物环境，提高植株净光合速率，促进根系生长[8]。因此，使用黏土

**收稿日期：**2022-08-07； **修订日期：**2022-08-25
**基金项目：**新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2019B00005,2022B03030)；中国科学院西部青年学者(2021-XBQNXZ-002)；国家自然科学基金项目(31971731)资助
**作者简介：**马迪乃·阿布力米提(1998-)，女，硕士研究生，主要从事荒漠化治理与生态恢复研究.
E-mail: madinaiabulimiti20@mails.ucas.ac.cn
**通讯作者：**李从娟(1982-)，女，博士，副研究员，主要从事荒漠化治理与生态恢复研究. E-mail: licj@ms.xjb.ac.cn

材料改良风沙土结构及保水能力被认为是一种行之有效的方法[9]。

膨润土作为一种天然黏土，是以蒙脱石为主要成分的硅酸盐类矿物，具有较高的阳离子交换量，其独特的晶体结构具有良好的吸水膨胀、蓄水保水能力，加之其良好的黏结特性及环境友好性，有利于重塑风沙土土壤结构[10-12]。腐殖酸是一种天然有机高分子化合物，是土壤有机质的主要组成成分，具有改良土壤、增效肥料、促进作物生长等功能[13-14]。有机肥是植物生长所需的关键营养物质，对于改善植物生存微环境有重要作用[15]。以往有关土壤改良的研究大都集中在膨润土对腐殖酸、有机肥等土壤肥力保持的作用，或者关注于有机肥、腐殖酸某一因子对土壤肥力提升的作用上，很少有关于膨润土与腐殖酸、有机肥等有机质相结合对土壤理化性质及植物生长的影响，尤其是在沙漠化区域的风沙土中。因此，本实验以古尔班通古特沙漠风沙土为研究对象，通过在风沙土中添加不同质量分数、不同膨润土与有机肥、腐殖酸组合的改良剂，分析其对风沙土理化性质(pH、电导率、保水率、容重、渗透系数、田间持水量)以及植物发芽率与生物量的影响，结合风沙土结构扫描电镜(SEM)观察，浅析膨润土在风沙土改良中的作用及机理，进而为沙漠化地区的风沙土改良及植被恢复提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料选择

本研究盆栽实验以一年生高粱属禾本科草木植物苏丹草(*Sorghum sudanense*)为研究对象。苏丹草具产量高、耐干旱、营养价值高、生长速度快、再生能力强等特点[16]。盆栽所用风沙土取自古尔班通古特沙漠中国科学院新疆生态与地理研究所莫索湾沙漠研究站西南侧(45°07′11″N，86°00′56″E)流动沙丘，取样深度0~20 cm，其粒径分析如表1所示，主要以细沙为主，其中粒径在0.05~0.25 mm，粒径占比达61.4%。风沙土有机质含量为1.5 $g\cdot kg^{-1}$、全氮含量为0.1 $g\cdot kg^{-1}$、全磷含量为0.3 $g\cdot kg^{-1}$、有效氮含量为6.0 $mg\cdot kg^{-1}$。本实验使用的膨润土部分物理性质如表2所示。有机肥是植物通用型花木果蔬优质有机肥。腐殖酸购自安琪酵母股份有限公司。

### 1.2 试验设计

本研究共设置17组处理，分别为纯风沙土(CK)、纯膨润土(B)、膨润土+有机肥(BF)、膨润土+腐殖酸(BA)、膨润土+有机肥+腐殖酸(BFA)，除CK处理以外，其余处理均设置4个梯度(表3)。其中B、BF、BA、BFA 4个组合中膨润土添加量均为沙土质量的0.5%、1.0%、1.5%、2.0%，BF组合中有机肥添加量为沙土质量的1.0%，BA组合中腐殖酸添加量为沙土质量的0.5%，具体配比如表3所示。每个梯度设置了5个重复。采用室内盆栽控制试验，植物生长期内平均室温设定为22 ℃，平均湿度设定为40%。盆栽试验所采用盆高20.0 cm，盆口直径15.0 cm，盆底直径13.5 cm。于2021年10月27日播种，每盆播种10粒，播种后覆土0.5~1.0 cm，初次浇水使土壤含水率为土壤饱和含水量的80%。往后每10 d补一次水，使其达到土壤饱和含水量的80%。期间每日监测植物发芽情况直至发芽率不再变化。平均株高大于5 cm时，每盆定植2株健壮、一致的幼苗，在植物生长30 d后收获植株并测定其生物量，随后采集种植盆中的土壤用于土壤理化性质分析。

### 1.3 土壤分析

土壤理化性质的分析方法采用《土壤农业化学

表1 试样用土粒径分布

Tab. 1 Particle size distribution of test soil

| 粒径/mm | <0.05 | 0.05~0.10 | 0.10~0.25 | 0.25~0.50 | 0.50~1.00 |
|---|---|---|---|---|---|
| 占比/% | 7.5 | 13.0 | 48.4 | 28.5 | 1.7 |

表2 膨润土物理性质

Tab. 2 Physical properties of bentonite

| 矿物组成/% | | | | | | 胶质价/$mL\cdot g^{-1}$ | 膨胀容/$mL\cdot g^{-1}$ | 膨润值/$mL\cdot g^{-1}$ | 吸蓝量/$mL\cdot g^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Na_2O$ | $MgO$ | $Fe_2O_3$ | $K_2O$ | | | | |
| 68.3 | 7.1 | 3.5 | 2.7 | 2.5 | 1.1 | 52.0 | 57.0 | 22.0 | 39.7 |

表3 不同处理物料配比

Tab. 3 Ratio materials of different treatments

| 处理 | 膨润土质量分数/% | 有机肥质量分数/% | 腐殖酸质量分数/% |
|---|---|---|---|
| CK | - | - | - |
| B1 | 0.5 | - | - |
| B2 | 1.0 | - | - |
| B3 | 1.5 | - | - |
| B4 | 2.0 | - | - |
| BF1 | 0.5 | 1.0 | - |
| BF2 | 1.0 | 1.0 | - |
| BF3 | 1.5 | 1.0 | - |
| BF4 | 2.0 | 1.0 | - |
| BA1 | 0.5 | - | 0.5 |
| BA2 | 1.0 | - | 0.5 |
| BA3 | 1.5 | - | 0.5 |
| BA4 | 2.0 | - | 0.5 |
| BFA1 | 0.5 | 1.0 | 0.5 |
| BFA2 | 1.0 | 1.0 | 0.5 |
| BFA3 | 1.5 | 1.0 | 0.5 |
| BFA4 | 2.0 | 1.0 | 0.5 |

注："-"表示无添加；CK为空白对照；B1~B4分别为添加0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的膨润土；BF1~BF4分别为膨润土(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)+有机肥(1.0%)；BA1~BA4分别为膨润土(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)+腐殖酸(0.5%)；BFA1~BFA4分别为膨润土(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)+有机肥(1.0%)+腐殖酸(0.5%)。下同。

分析方法》[17]和《土壤物理性质测定法》[18]中的标准方法。土壤pH和电导率采用电位法(土水比1:5)，分别利用PHSJ-5实验室pH计和DDS-307电导率仪测定；土壤容重、土壤总孔隙度和土壤渗透系数用环刀法测定；田间持水量，即土壤最大持水量采用威尔科克斯法测定；土壤含水率，即土壤质量含水率用称量法测定；植物生物量的测定：将收获植株用去离子水洗净，擦干表面水分，测定植株鲜重。

### 1.4 扫描电镜分析

将风沙土与质量分数为2.0%的膨润土均匀混合后，并给质量分数为20%的水分，在室内自然风干4 h后，在105 ℃条件下烘干12 h，等样品冷却后，利用Zeiss Supra55 VP型扫描电镜观察膨润土与风沙土结合下的风沙土物理结构。

### 1.5 统计方法

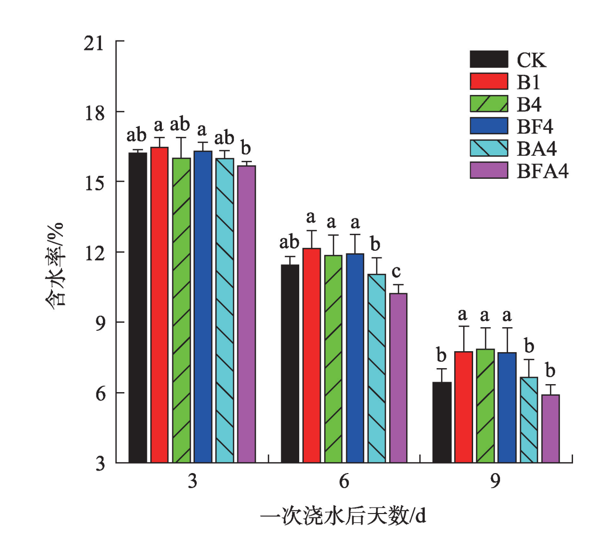
本试验采用Microsoft Excel 2019软件进行数据整理及数据分析；采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)对风沙土土壤含水率、pH、电导率、容重、总孔隙度、渗透系数、田间持水量、苏丹草发芽率和生物量进行分析，运用最小显著差异(LSD)对其进行检验；采用Origin 2022b软件进行绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同膨润土处理对风沙土理化性质影响

**2.1.1 土壤保水能力** 不同添加材料处理风沙土含水率对比如图1所示。浇水后的第3 d，各处理含水率与CK不存在显著差异($P>0.05$)。第6 d时，除了BFA4的土壤含水率较CK下降了11.9%，其余处理的含水率均与CK没有显著差别($P>0.05$)，BA4的含水率较B1、B4、BF4分别显著下降了10.0%、7.0%和8.1%($P<0.05$)。第9 d时，B1、B4和BF4的含水率较CK的含水率分别显著升高20.2%、21.9%和19.4%($P<0.05$)。

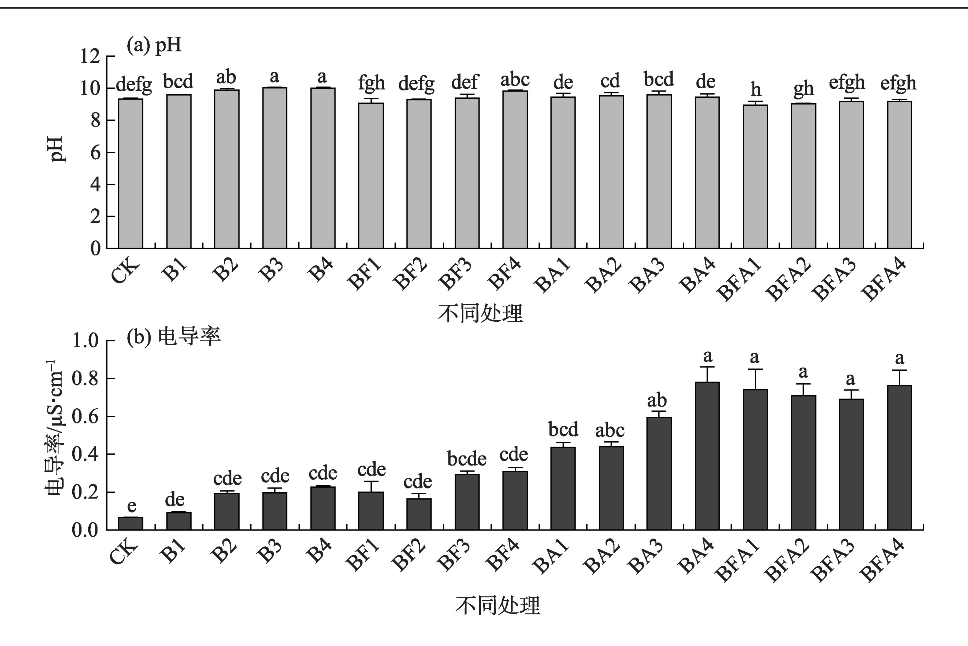
**2.1.2 土壤理化性质** 添加膨润土(B>0.5%)显著提高了风沙土的pH($P<0.05$)(图2a)，BF、BA和BFA的添加没有显著改变风沙土的pH($P>0.05$)。沙土中添加BA和BFA显著提高风沙土的电导率(图2b)($P<0.05$)。由表4可知，风沙土中添加B，随着添加量由1.5%增至2.0%时，盆栽土壤容重显著下降9.9%~11.1%($P<0.05$)，总孔隙度显著增加11.7%~




注：不同小写字母表示不同添加材料、不同配比处理间差异显著($P<0.05$)；CK为空白对照；B1为添加0.5%膨润土；B4为添加2.0%膨润土；BF4为添加膨润土(2.0%)+有机肥(1.0%)；BA4为添加膨润土(2.0%)+腐殖酸(0.5%)；BFA4为添加膨润土(2.0%)+腐殖酸(0.5%)+有机肥(1.0%)。下同。

图1 不同处理土壤含水率对比

Fig. 1 Comparison of soil moisture content in different treatments




注：CK为空白对照；B1~B4分别为添加0.5%、1.0%、1.5%、2.0%的膨润土；BF1~BF4分别为膨润土(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)+有机肥(1.0%)；BA1~BA4分别为膨润土(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)+腐殖酸(0.5%)；BFA1~BFA4分别为膨润土(0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)+有机肥(1.0%)+腐殖酸(0.5%)。下同。

图2 盆栽风沙土pH和电导率对比

Fig. 2 Comparison of pH and conductivity of potting aeolian sand soil

13.1%($P$<0.05)，渗透系数显著降低56.7%~73.3%($P$<0.05)，田间持水量显著增加15.4%~16.1%($P$<0.05)；而在其余处理中，随着B添加量由1.0%增至2.0%时，容重显著下降4.6%~14.5%，总孔隙度显著增加6.8%~19.4%，渗透系数显著减小60.0%~80.0%，田间持水量显著增加18.2%~36.6%($P$<0.05)。

### 2.2 不同膨润土添加对苏丹草发芽及生长影响

不同膨润土添加处理对苏丹草的发芽及生长状况的影响不尽相同(图3)。由图3a可知，添加B，苏丹草的发芽率较CK提高了6.7%~26.7%。BF(B>1.0%)处理中，发芽率提高了13.3%~33.3%；添加BA，当膨润土添加量较小(B=0.5%)时，发芽率增加6.7%，膨润土添加量由1.0%增至2.0%时，发芽率下降26.7%~40.0%；尤其是在BFA中，植物发芽率下降20.0%~40.0%。由图3b可知，风沙土中添加B，苏丹草生物量增加13.5%~16.5%；添加BF，生物量增加1.5%~8.6%；添加BA(B=0.5%)，生物量增加了1.4%；B添加量由1.0%增至2.0%时，减小了22.5%~41.1%；而在BFA添加后，生物量显著减小了33.0%~61.8%($P$<0.05)。

### 2.3 膨润土对风沙土理化性质及植物生长的影响

由图4a可知，膨润土与土壤pH、电导率、田间持水量呈显著正相关($P$<0.05)，与土壤总孔隙度呈极显著正相关($P$<0.01)，与土壤容重和渗透系数呈极显著负相关($P$<0.01)；有机肥与土壤pH呈极显著负相关($P$<0.01)；腐殖酸与电导率和田间持水量呈极显著正相关($P$<0.01)。由图4b可知，膨润土添加作用下的风沙土理化性质可以解释苏丹草生长状况53.165%的变异，其中苏丹草发芽率与土壤容重、渗透系数、pH呈正相关，与土壤电导率、总孔隙度呈负相关；苏丹草生物量与土壤渗透系数、pH、总孔隙度呈正相关，与土壤电导率、容重呈负相关。不同处理条件通过影响土壤理化性质，间接影响植物的生长状况。

### 2.4 扫描电镜观察

图5是风沙土和含2.0%膨润土的风沙土在扫描电镜下放大300倍观察到的图像。由图5a知，自然状态下风沙土表面相对光滑，沙粒与沙粒之间空隙较大，没有吸附黏结在一起。而添加膨润土，膨润土遇水后在沙粒表面形成了由膨润土包裹的包衣，膨润土与风沙土相互黏合、吸附、团聚在一起，且团聚体的表面粗糙(图5b)。

## 3 讨论

### 3.1 膨润土在风沙土物理结构改善中的作用

土壤容重、总孔隙度、渗透系数等是表征土壤

表4　不同处理对土壤物理性质的作用

**Tab. 4　Effects of different treatments on soil physical properties**

| 处理 | 容重/g·cm$^{-3}$ | 总孔隙度/g·cm$^{-3}$ | 渗透系数/mm·min$^{-1}$ | 田间持水量/% |
|---|---|---|---|---|
| CK | 1.52±0.02a | 42.55±0.66b | 0.60±0.05a | 12.84±0.41b |
| B1 | 1.39±0.02ab | 47.49±0.57a | 0.31±0.03b | 12.59±0.43a |
| B2 | 1.43±0.03ab | 45.92±1.21ab | 0.29±0.07b | 12.16±0.20b |
| B3 | 1.35±0.04b | 48.98±1.63a | 0.26±0.00c | 15.18±0.31a |
| B4 | 1.37±0.07b | 48.19±2.27a | 0.16±0.04d | 15.31±0.35a |
| CK | 1.52±0.02a | 42.55±0.66b | 0.60±0.05a | 12.84±0.41c |
| BF1 | 1.50±0.04a | 43.43±1.39b | 0.27±0.02b | 13.24±0.47bc |
| BF2 | 1.34±0.03b | 49.62±0.95a | 0.12±0.01b | 14.48±0.94ab |
| BF3 | 1.30±0.03b | 50.81±1.20a | 0.16±0.00b | 14.66±0.81a |
| BF4 | 1.36±0.06b | 48.72±2.17a | 0.18±0.06c | 15.11±0.20aA |
| CK | 1.52±0.02a | 42.55±0.66c | 0.60±0.05a | 12.82±0.41c |
| BA1 | 1.51±0.01ab | 42.88±0.26bc | 0.27±0.02b | 13.98±0.09bc |
| BA2 | 1.40±0.02bc | 47.17±0.74ab | 0.12±0.01d | 14.41±0.61bc |
| BA3 | 1.45±0.01cd | 45.43±0.22abc | 0.16±0.00cd | 16.01±0.89b |
| BA4 | 1.34±0.04d | 49.92±1.60a | 0.18±0.06c | 16.15±0.58a |
| CK | 1.52±0.02a | 42.55±0.66c | 0.60±0.05a | 12.82±0.41c |
| BFA1 | 1.46±0.01ab | 44.77±0.44c | 0.27±0.03b | 17.23±0.63a |
| BFA2 | 1.38±0.02cd | 47.98±1.66ab | 0.19±0.06c | 16.40±0.13b |
| BFA3 | 1.44±0.01b | 45.85±0.70bc | 0.15±0.0 4c | 17.51±0.77a |
| BFA4 | 1.33±0.04d | 49.79±0.97a | 0.14±0.02c | 16.70±0.51b |

注：数值均为平均值±标准差，$n$=5；不同小写字母表示相同添加材料、不同膨润土含量之间存在显著差异（$P$<0.05）。

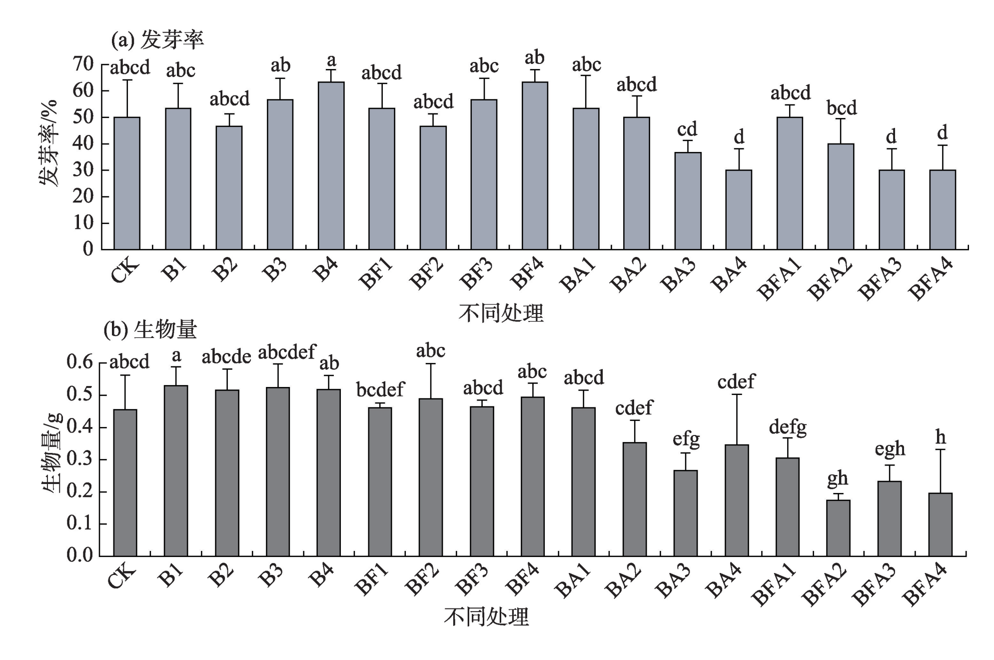
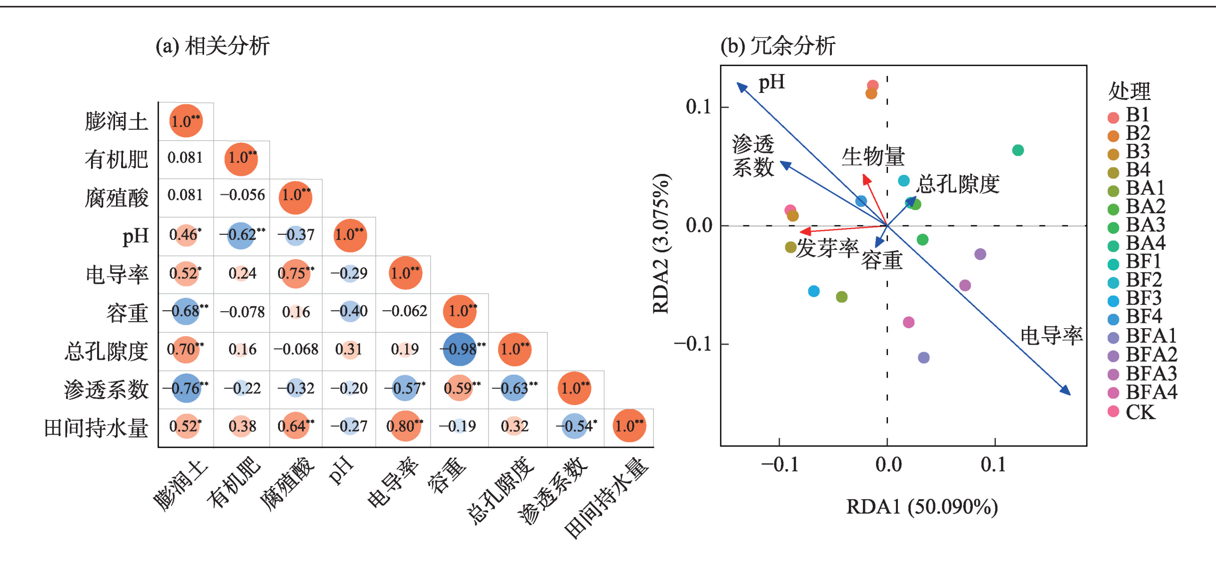



图3　不同处理条件下苏丹草发芽率和生物量

Fig. 3　Emergence rate and biomass of *Sorghum sudanense* under different treatments

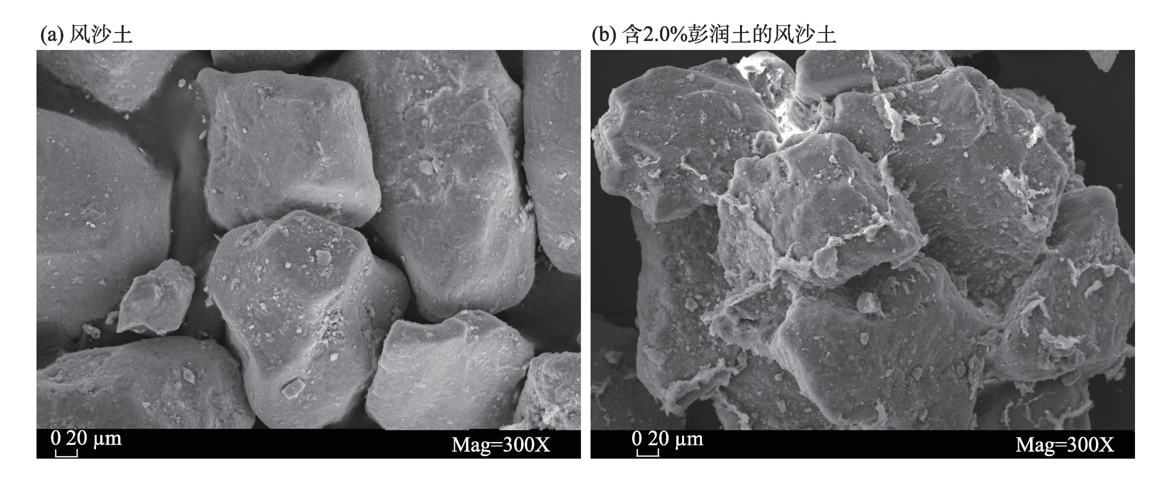
物理性质的指标，影响着土壤水、肥、气、热条件的变化及作物的健康生长[19]。黏土矿物具有较大的比表面积，有一定的吸附和黏结作用，在改善土壤物理结构中发挥重要作用[20]。添加BF处理中，随着膨润土含量增加，土壤容重显著降低、土壤孔隙度显著增加，该研究成果证实了膨润土添加有利于风




注：图a中数值为相关系数；*、**分别表示相关关系显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)；橙色表示正相关；蓝色表示负相关。

图4 膨润土与土壤理化性质的相关性分析及土壤理化性质对植物生长状况的冗余分析(RDA)

Fig. 4 Correlation analysis between bentonite and soil physical and chemical properties and redundancy analysis of soil physical and chemical properties on plant growth status




注：Mag=300X表示放大300倍。

图5 风沙土与2.0%膨润土添加下风沙土的扫描电镜图像对比

Fig. 5 Comparison of scanning electron microscope images of aeolian sand and aeolian sand treated with 2.0% bentonite

沙土物理性质的改善。这与周磊[21]的研究结果一致，其结果证实在沙地上一次性施膨润土7 a后，可显著改善沙地的土壤结构，土壤容重降低2.0%~6.0%。这与膨润土本身的胶质价、膨胀容和吸蓝量(表2)，以及其自身的吸水膨胀性、黏结性和较大的比表面积有关[22-24]。正如扫描电镜所观察到的结果(图5)，这些特性使得膨润土可以有效吸附、黏结周边细小颗粒，促进土壤大团聚体的形成，改善土壤的容重和总孔隙度。另外，本实验结果表明，不同膨润土材料的添加使风沙土渗透系数显著减小，该结果与赵旭等[25]在室内模拟实验结果相似，其结果证实添加膨润土使得土壤饱和导水率、导气率和相对气体扩散率降低。这可能是因为膨润土具有吸水膨胀性，能够将水分吸持在自身，并膨胀堵塞土壤有效孔隙，阻挡土壤水分下渗的通道，从而减小渗透系数。另外，加水具有很好的流变性，失去水分后凝结保持膨胀后的状态，膨润土具有Yi等[26]研究中提到的沙土改良剂的流变性和固化性。

田间持水量是衡量土壤保水能力的重要指标，尤其对于干旱区的土壤灌溉和作物水分管理具有十分重要的意义[27]。本研究在风沙土中添加膨润土和有机肥提高了风沙土保水能力、增加了风沙土的田

间持水量，该实验结果与马斌等[28]、李吉进等[29]的研究结果相似。这一方面因为膨润土黏粒含量高，吸湿性强，能够吸附8~15倍于自身体积的水量[25]；另一方面可能因为膨润土和有机质增加了沙土中黏粒，促进团聚体的形成(图5)，改变了风沙土的松散结构，进而提高了土壤的持水和保水能力[30-31]。类似的结果也被Zhou等[32]和王瑛等[33]研究所证实，尤其是添加膨润土的基础上，额外添加腐殖酸或菌渣等有机物能够促进土壤团聚体的生成，提高沙土保水保肥性。但是本研究中添加BFA后的风沙土保水能力并不及B处理，且BA处理后的保水性不如BF处理，这一方面可能是因为本实验中使用的腐殖酸保水性不如有机肥，另一方面可能因为膨润土的碱性与腐殖酸的酸性相中和释放的热使土壤水分散失更快。总之，在膨润土添加中应该慎用腐殖酸。

### 3.2 膨润土添加存在潜在盐碱化风险

土壤pH是能够迅速判断土壤一般化学状况并反映土壤酸碱度的指标[34]。本研究中，膨润土添加显著提高风沙土的pH，其余处理均没有显著影响风沙土的pH。这可能是因为膨润土含有的$Na^+$、$Mg^{2+}$等可交换碱阳离子和碳酸盐提高了土壤碱性，腐殖酸和有机肥具有的酸性有机胶体，中和了土壤的碱性。土壤电导率反映的是土壤中可溶性盐含量，含盐量太高的土壤对植物生长产生负面影响。本研究中，膨润土和腐殖酸添加量与电导率呈显著正相关，添加膨润土和有机肥使风沙土电导率增大，这可能是因为本研究用的膨润土是钠基膨润土，含有大量的$Na^+$和碳酸盐，腐殖酸含有碱性基团，导致土壤电导率增加。因此，膨润土在实际施用当中，一方面要考虑添加量避免土壤盐碱化的发生，另一方面可以选择一些抗盐碱植物来减少盐碱对土壤及植物带来的危害。另外，施用膨润土应该避免施用在盐碱地，以免加重土壤盐碱化问题。

### 3.3 膨润土添加对苏丹草生长的影响

本研究表明，在风沙土中添加膨润土，提高苏丹草种子的发芽率和苏丹草生物量，该结果与前人多数实验结果类似。Al-Harbi等[35]的温室盆栽实验结果表明，膨润土的加入显著增加了黄花产量。宋计平等[36]研究表明膨润土对黄瓜生长状况具有积极影响，且影响达显著水平。可能是因为膨润土在改善土壤物理结构和保水能力的同时，引入了一些膨润土自身携带的植物所需的常量和微量营养元素，为植物的生长提供良好的水、肥、气、热条件，提高植物光合特性[37]，促进了植物的生长。

本研究中混合施用膨润土和有机肥，相较于对照组苏丹草种子的发芽率和生物量都有所提高，这可能是因为有机肥和膨润土协同作用，对风沙土起到了很好的保水保肥作用，促进了植物的生长。苏雪萍[38]将91.0%膨润土与生物素、植物纤维等混合制备沙质土壤改良剂施用于沙质土壤，结果表明玉米的发芽率、株高日增量及幼苗干物质增长速率均得到显著的提高，与本研究结果一致。

而本研究中添加腐殖酸对苏丹草生长状况的影响并不乐观，苏丹草的发芽率和生物量均较对照出现下降趋势。这与添加腐殖酸的处理组中风沙土含水率随时间下降速度较快是分不开的。另一方面，这可能是土壤含盐量(电导率)增大导致的(图2b)，含盐量增加抑制了植物的发芽和生长，也有可能是膨润土和腐殖酸吸水干燥后，土壤表面形成固结层，影响了种子萌发出土和生长[39]。这个研究结果进一步证实了添加膨润土的基础上，额外添加腐殖酸不仅影响土壤的保水能力，而且会限制植物的生长，这与腐殖酸本身在农作物生长中的促进作用是相悖的。这或许与本研究所添加的腐殖酸量有关，也或许与膨润土与腐殖酸遇水相互作用有关，未来将进一步对其机理进行深入研究。

### 3.4 膨润土在风沙土改良应用前景

中国膨润土资源储量居世界首位，种类繁多，易开采，价格低廉[40]，且我国多数受风沙灾害的地区或者其邻近地区有丰富的膨润土资源。充分利用膨润土的一些天然优良特性，有效结合当地的农林业废弃物如农作物秸秆、枯树枝叶，以及农林产品加工的副产物如谷壳、木屑等制备土壤改良剂，能够实现因地制宜、资源的合理利用，能够降低风沙灾害地区治理风沙土和植物恢复的成本。其次，考虑到干旱沙漠地区的盐碱化问题，加上膨润土本身可能会给土壤带来二次盐碱化的风险，在生态恢复中除了考虑节水抗旱的物种外，还应该选择一些盐生植物或者抗盐碱的物种。

## 4 结 论

综上所述，沙漠地区风沙土以沙粒为主，黏粒含量极少，风沙土土壤结构松散，风沙土的物理结

构和持水性亟待改善。膨润土由于其吸水膨胀性、黏结性,能有效将沙土颗粒吸附黏结在一起,促进土壤团聚体的形成。本研究证实了风沙土中添加膨润土及有机肥,不仅提高了风沙土的保水性能,又改善了土壤的物理性质,从而提高了苏丹草的发芽率和生物量,对于风沙土的改良、干旱区植物生长和生存具有积极作用。所以合理有效的开发利用膨润土与其他有机物质,使其发挥优良特性,对于干旱沙漠化地区风沙土质量的提高、生态恢复及植被重建有重要意义。

## 参考文献(References)


[1] 关欣, 张凤荣, 巧云. 新疆土地资源的持续利用与开发[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 95-101. [Guan Xin, Zhang Fengrong, Qiao Yun. Sustainable utilization and explotation of land resources in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 95-101. ]

[2] 李路, 孙桂丽, 陆海燕, 等. 喀什地区生态脆弱性时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 277-288. [Li Lu, Sun Guili, Lu Haiyan, et al. Spatial-temporal variation and driving forces of ecological vulnerability in Kashi Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 277-288. ]

[3] 王晓峰, 张明明, 尹礼唱, 等. 2000—2015年中国干旱半干旱地区沙漠化进程驱动力研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 948-957. [Wang Xiaofeng, Zhang Mingming, Yin Lichang, et al. Study on the driving factors in desertification process in arid and semi-arid region of China from 2000 to 2015[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(5): 948-957. ]

[4] 胡彦婷, 张富, 罗珠珠, 等. 半干旱区降水和水土保持措施强度-径流演变规律研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1426-1434. [Hu Yanting, Zhang Fu, Luo Zhuzhu, et al. Precipitation and soil and water conservation measures intensity-runoff evolution law in semi-arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1426-1434. ]

[5] Zhang F Y, Zhao C X, Lourenco D, et al. Factors affecting the soil-water retention curve of Chinese loess[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 80(1): 717-729.

[6] Ismail S M, Ozawa K. Improvement of crop yield, soil moisture distribution and water use efficiency in sandy soils by clay application [J]. Applied Clay Science, 2007, 37(1-2): 81-89.

[7] 赖西聪, 黄家森, 肖凯升, 等. 粘土矿物对农田土壤保肥性能的研究[J]. 四川化工, 2018, 21(2): 6-8. [Lai Xicong, Huang Jiasen, Xiao Kaisheng, et al. Study on soil fertility control of clay minerals in farmland[J]. Sichuan Chemical Industry, 2018, 21(2): 6-8. ]

[8] Mohammadifard F, Tarakemeh A, Moghaddam M, et al. Bentonite mitigates the adverse effects of drought stress in fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.)[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(1): 1098-1111.

[9] Pi H W, Huggins D R, Sharratt B. Soil wind erosion influenced by clay amendment in the inland Pacific Northwest, USA[J]. Land Degradation and Development, 2020, 32(1): 241-255.

[10] Mi J Z, Gregorich E, Xu S T, et al. Effects of a one-time application of bentonite on soil enzymes in a semi-arid region[J]. Canadian Journal of Soil science, 2018, 98(3): 1-39.

[11] Han B, Weatherley A J, Mumford K, et al. Modification of naturally abundant resources for remediation of potentially toxic elements: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 421(5): 1-13.

[12] Mi J Z, Liu J H, Xu S T, et al. Effects of sandy soil amendment on soil moisture and growth status of millet with rainfed sandy soil in a semi-arid region[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1092-1093(3): 1234-1242.

[13] 肖富容, 李东坡, 武志杰, 等. 添加生化抑制剂和腐植酸的稳定性增效尿素在黄土中的施用效果[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4419-4428. [Xiao Furong, Li Dongpo, Wu Zhijie, et al. Application effect of high efficiency and stability urea added with biochemical inhibitors and humic acid in loess[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4419-4428. ]

[14] Tahir M M, Khurshid M, Khan M Z, et al. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils[J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 126755, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126755.

[15] 王先哲. 虻粪有机肥对土壤理化及其微生物群落演变的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. [Wang Xianzhe. Effect of blank soldier fly vermicompost on soil physicochemical and microbial community structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. ]

[16] 周文君. 改性生物质炭及联合苏丹草对石油污染土壤修复效应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021. [Zhou Wenjun. Study on the remediation effect of modified biochar and combined Sudan grass on petroleum contaminated soil[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021. ]

[17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 20-87. [Lu Rukun. Methods for agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 20-87. ]

[18] 中科院南京土壤研究所土壤物理室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 3-147. [Soil Physics Office, Nanjing Institute of Soil, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press,1978: 3-147. ]

[19] 张然, 史雷, 马龙, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量及土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 325-330, 336. [Zhang Ran, Shi Lei, Ma Long, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat yield and soil physical properties in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 325-330, 336. ]

[20] Li T, Dai F L, He Y F, et al. An eco-friendly polymer composite fertilizer for soil fixation, slope stability, and erosion control[J].

Polymers, 2022, 14(7): 1461, doi: 10.3390/polym14071461.

[21] 周磊. 改性膨润土对科尔沁沙地土壤改良效应及机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [Zhou Lei. Amelioration effect and mechanism of modified bentonite application to Horqin Sandy soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. ]

[22] Alghamdi A G, Aly A A, Al-Omran A M, et al. Impact of biochar, bentonite, and compost on physical and chemical characteristics of a sandy soil[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(21): 670, doi: 10.1007/s12517-018-3939-y.

[23] Aref A, Alkhafaji A R, Chun J A, et al. Characteristics, modification and environmental application of Yemen's natural bentonite [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(3): 841-853

[24] 王飞, 管俊芳, 刘玉芹, 等. 新疆某地膨润土离子交换及膨胀性研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(1): 73-76. [Wang Fei, Guan Junfang, Liu Yuqin, et al. Study on ion exchange and swelling properties of Xinjiang bentonite[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(1): 73-76. ]

[25] 赵旭, 樊军, 王茜, 等. 添加木本泥炭和膨润土对侵蚀退化黑土理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(4): 953-963. [Zhao Xu, Fan Jun, Wang Qian, et al. Effects of adding woody peat and bentonite on physical and chemical properties of eroded and degraded blank soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 953-963. ]

[26] Yi Z J, Zhao C. Desert "soilization": An eco-mechanical solution to desertification[J]. Engineering, 2016, 2(3): 270-273.

[27] 郭富兴. 环刀法在干旱半干旱地区田间持水量测定的改进与应用探讨[J]. 水利技术监督, 2021(7): 25-29. [Guo Fuxing. Improvement and application of ring knife method in field capacity measurement in arid and semi-arid areas[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(7): 25-29. ]

[28] 马斌, 刘景辉, 杨彦明, 等. 不同膨润土施用量对旱作农田土壤保水能力和燕麦产量的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(8): 42-49. [Ma Bin, Liu Jinghui, Yang Yanming, et al. Effect of different bentonite on soil capacity of water-holding and oats yield in rainfed field[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2015, 24(8): 42-49. ]

[29] 李吉进, 徐秋明, 倪小会, 等. 施用膨润土对土壤含水率和有机肥含量的影响[J]. 华北农学报, 2002, 17(2): 88-91. [Li Jijin, Xu Qiuming, Ni Xiaohui, et al. Effects of bentonite on content of soil water and soil organic matter[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2002, 17(2): 88-91. ]

[30] 干方群, 杭小帅, 刘云, 等. 苏南地区膨润土物理化学和矿物学特性研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 945-954. [Gan Fangqun, Hang Xiaoshuai, Liu Yun, et al. Physicochemical and mineralogical properties of bentonite in south Jiangsu, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 945-954. ]

[31] 宗莉, 杨效和, 王爱勤. 腐植酸复合材料对沙土理化性质和植物生长的影响[J]. 腐植酸, 2015(2): 15-19, 32. [Zong Li, Yang Xiaohe, Wang Aiqin. Effect of humic acid composite materials on physic-chemical properties of sandy soil and plant growth[J]. Humic Acid, 2015(2): 15-19, 32. ]

[32] Zhou L, Monreal C M, Xu S T, et al. Effect of bentonite-humic acid application on the improvement of soil structure and maize yield in a sandy soil of a semi-arid region[J]. Geoderma, 2019, 338: 269-280.

[33] 王瑛, 王梅, 苏金娟, 等. 天然钠基膨润土菌渣复合材料对提高沙土保水保肥效应的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(23): 99-108. [Wang Ying, Wang Mei, Su Jinjuan, et al. Impacts of natural sodium bentonite mushroom residue composite on improving water and fertilizer retention effect in sandy soil[J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(23): 99-108. ]

[34] He M J, Xiong X N, Wang L , et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 414 (20): 125378, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125378.

[35] Al-Harbi A R, Al-Omran A M. Effect of natural and synthetic soil conditioners on the growth and production of cucumber in greenhouse[J]. Acta Horticulturae, 2003(609): 441-445.

[36] 宋计平, 殷和勤, 杨延杰, 等. 不同土壤调理剂对黄瓜生长、品质及产量的影响[J]. 北方园艺, 2016(23): 19-23. [Song Jiping, Yin Heqin, Yang Yanjie, et al. Effects of different soil conditioners on growth, yield and quality of cucumber[J]. Northern Horticulture, 2016(23): 19-23. ]

[37] 米俊珍. 旱作谷子施用膨润土蓄水保墒增产生态机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. [Mi Junzhen. Study on ecological mechinism of bentonite amendment on soil water holding capacity and millet yield increase in rain-fed cropland[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. ]

[38] 苏雪萍. 沙质土壤改良剂对玉米抗旱保苗与土壤改良效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014. [Su Xueping. Effects of sandy soil amendment on keeping crop seedling against drought and soil improvement to maize[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. ]

[39] 周春生, 龚萍, 刘伟, 等. 改性膨润土对沙地土壤改良及紫花苜蓿生长状况的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 16-22. [Zhou Chunsheng, Gong Ping, Liu Wei, et al. Amending sandy soils with modified bentonite to improve its physical properties and crop growth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40 (7): 16-22. ]

[40] 郑长文, 管俊芳, 郑佳敏, 等. 矿业领域膨润土应用的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2020(3): 22-27. [Zheng Changwen, Guan Junfang, Zheng Jiamin, et al. Progress in the application of bentonite in mining industry[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3): 22-27. ]

# Effect of bentonite on physical and chemical properties of aeolian sandy soil and growth of *Sorghum sudanense*

Madinai ABULIMITI[1,2], ZHANG Yongjuan[3], WANG Li[4], ZHAO Li[5], LI Congjuan[1,2]

(1. National Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Urumqi City Landscaping Engineering Quality Supervision Station, Urumqi 830017, Xinjiang, China; 4. Xinjiang Uygur Autonomous Region Grassland Station, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 5. Key Laboratory of Ecological Hydrology & Disaster Prevention in Arid Area, Northwest Institute of Investigation, Planning & Design of the State Forestry & Grassland Administration, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** Drought and desertification have become a worldwide resource and environmental problem, causing the reduction in eolian sandy soil capability to hold water and fertilizer, lowering the soil quality, resulting in the scarcity of vegetation, and seriously limiting the agricultural and forestry production and crop growth in desertification areas. Therefore, for the healthy growth of soil desertification zones, it is crucial to develop a type of material that can not only preserve water but also improve the physical and chemical properties of soil in this area. Bentonite, a naturally occurring mineral, has excellent water absorption, water storage, and adsorption capabilities due to its distinctive crystal structure. This study selected the sand soil obtained from the Gurbantunggut Desert in Xinjiang of China as the research object and examined the effects of bentonite addition with different mass fractions and combinations (combined bentonite with organic fertilizer, humic acid) on water retention capacity, soil physical, and chemical properties (pH, conductivity, water retention, bulk density, permeability coefficient, and field capacity) improvement and plant growth of eolian sandy soil. Moreover, this study analyzed the effect and mechanism of bentonite on eolian sand soil improvement based on scanning electron microscopy (SEM) observation of eolian sand structure. The result showed the following: (1) The water content of aeolian sandy soil was significantly increased by 19.4%−21.9% ($P<0.05$) by the addition of 0.5% bentonite (B1), by the addition of 2.0% bentonite (B4) and by the combination of 2.0% bentonite and 1.0% organic fertilizer (BF4) ($P<0.05$). (2) Bentonite combinations of all treatments significantly improved the physical properties of aeolian sandy soil, and the addition of bentonite (B>0.5%) significantly decreased bulk density by 9.9%−11.1% ($P<0.05$), increased the total porosity by 11.7%−13.1% ($P<0.05$), decreased the osmotic coefficient by 56.7%−73.3% ($P<0.05$), and increased the field water capacity by 15.4%−16.1% ($P<0.05$). (3) In addition, the addition of bentonite (B>0.5%) significantly increased the pH of aeolian sandy soil ($P<0.05$), while the other treatments had no significant effect on pH ($P>0.05$). The combination of bentonite and humic acid (BA) and the combination of bentonite, humic acid, and organic fertilizer (BFA) significantly increased the conductivity of aeolian sandy soil ($P<0.05$). (4) The study on plant growth found that adding B and BF improved the germination rate and biomass of *Sorghum sudanense*. (5) The results of correlation analysis and redundancy analysis showed that bentonite and organic fertilizer played a significant role in biological growth by improving soil physical and chemical properties. (6) Moreover, the results of the SEM showed that bentonite played a role in water absorption expansion and bonding and binds sand grains together. In conclusion, adding bentonite and organic fertilizer to eolian sandy soil can improve the physical properties and improve the soil's water retention capacity, which is conducive to the improvement of eolian sandy soil and plant recovery in desertification areas.

**Key words:** bentonite; soil amelioration; physical and chemical properties; growth state